

Die Entwicklung der Ballistik von Aristoteles bis Euler Ein Beitrag zum Euler-Jahr 2007

Sonar, Thomas

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 59, 2007,
S.203-230



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Die Entwicklung der Ballistik von Aristoteles bis Euler*

Ein Beitrag zum Euler-Jahr 2007

THOMAS SONAR

Institut für Computational Mathematics, TU Braunschweig
Pockelsstr. 14 D, D-38106 Braunschweig

Dem Freund Gerd Biegel in tiefer Verbundenheit gewidmet

Gegen Anfang des dritten Jahres, im August neunundneunzig, erachtete es mein Onkel Toby für unerlässlich, was wenigstens von Ballistik zu verstehen: – Und da er's für das Beste hielt, seine Kenntnisse aus dem Urquell zu schöpfen, so hub er mit N. Tartaglia an, der, wie's scheint, als erster die irrige Annahme aufdeckte, eine Kanonenkugel richte all ihre Verheerung in einer geraden Linie an.

LAURENCE STERN – Leben und Ansichten von Tristram Shandy, Gentleman.

1. Was ist Ballistik?

Das Wort „Ballistik“ leitet sich aus dem griechischen Wort $\beta\alpha\lambda\lambda\epsilon\iota\nu$ für „werfen“ her und kann damit am besten mit „Lehre von den geworfenen Körpern“ übersetzt werden. Wir heutigen verbinden damit allerdings keineswegs mehr eine Lehre vom Wurf, sondern eine Lehre von der Geschosßbahn eines Projektils, und in der Tat ist dies genau ein Teil der heutigen Bedeutung. Allerdings unterscheidet der moderne Ballistiker die Bereiche

1. Innenballistik

- beinhaltet die Vorgänge im Inneren einer Waffe beim Abschuss eines Projektils, also insbesondere die Gasdynamik im Inneren eines Geschützrohres.

* (Eingegangen 28.12.2007) Der Vortrag wurde am 16.03.2007 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

2. Außenballistik

- beinhaltet die Vorgänge während des Fluges des Projektils, also insbesondere die Flugbahn.

3. Abgangsballistik

- beinhaltet die Vorgänge an der Mündung eines Geschützrohres beim Schuss.

4. Zielballistik

- beinhaltet die Wirkung eines Geschosses im Ziel.

Wir wollen keine Raketenballistik betrachten, sondern von nur passiv angetriebenen Geschossen sprechen. Weiterhin wollen wir uns auf die Außenballistik konzentrieren und nur wenig zur Innenballistik, nichts aber zur Abgangs- und Zielballistik sagen. Auch soll nicht der eingeschränkte moderne Blick auf die Ballistik im Vordergrund stehen, der nur Gewehre und Kanonen sieht, sondern wir wollen uns auch mit Wurftheorien auseinander setzen, die am Beginn der Geschichte der Ballistik stehen.

2. Die Wurftheorie des Aristoteles

Über den Himmel – *De caelo* – ist eines der faszinierendsten Bücher des Aristoteles und gleichzeitig eines der interessantesten. In ihm entwirft der Philosoph das Konzept eines Universums, das für etwa 1900 Jahre das Denken bestimmen wird.

Jede räumliche Bewegung, so Aristoteles, ist entweder geradlinig oder kreisförmig oder aus beiden gemischt¹. Diese Bewegungstypen heißen „einfach“. Unter Rückgriff auf die Pythagoräer, das das All und Alles durch die Drei bestimmt werde, da Ende, Mitte und Anfang die Zahl des Alls habe und somit der Dreiheit eine besondere Rolle zukäme, schließt Aristoteles, dass es keine weiteren Bewegungen außer den drei einfachen geben kann. Die einfachen Bewegungen werden nun den einfachen Körpern, den Elementen, zugeordnet: Feuer bewegt sich geradlinig nach oben, Erde geradlinig nach unten. Beide Bewegungen haben etwas mit „Schwere“ bzw. „Leichte“ der Elemente zu tun. Wenn es irgendwo eine naturgemäße Kreisbewegung gebe, dann muss es dazu einen einfachen Körper, also ein Element, geben, der sich von Natur aus im Kreis bewegt. Da kein Element auf der Erde sich von Natur aus kreisförmig bewegt wird geschlossen, dass es ein weiteres, göttliches Element geben muss, das um so ehrwürdiger ist, je weiter es von den vier Elementen Feuer, Erde, Wasser, Luft ent-

¹ ARISTOTELES: Vom Himmel, Von der Seele, Von der Dichtkunst. Zürich und München 1950. 268bff.

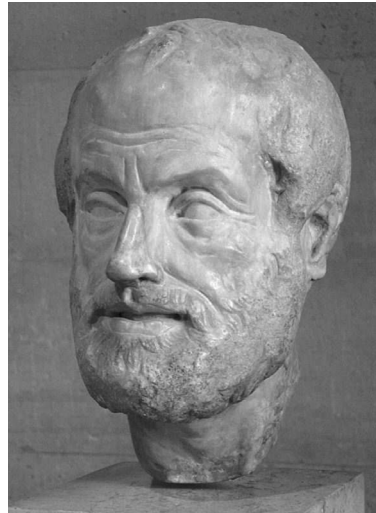


Abb. 1: Aristoteles.

fernt ist. Der neue einfache Körper kann aber weder Schwere noch Leichte haben, denn dann würde er sich nicht kreisförmig bewegen, sondern geradlinig auf eine Mitte zu oder davon weg. Auch muß der neue Körper unveränderlich und unvergänglich sein, denn alles Vergängliche vergeht dadurch, dass etwas ihm Entgegengesetztes wirkt. Zur Kreisbewegung gibt es aber nichts Entgegengesetztes. Ein einfacher Körper nimmt zu, in dem etwas Verwandtes hinzutritt und in seiner Materie aufgeht. Der neue Körper ist aber von den vier Elementen auf der Erde verschieden und muss daher unveränderlich sein. Da dieses neue fünfte Element – „der erste Körper“, wie Aristoteles sagt – also ewig unveränderlich ist, ist die Kreisbewegung göttlich; da dem Göttlichen nur der oberste Ort zukommt, finden wir den ersten Körper am Himmel wieder, was die Unveränderlichkeit des Sternenhimmels, von der wir aus Berichten der Generationen vor uns wissen, dokumentiert. Das neue, fünfte Element wird später auch die „Quintessenz“ (*quinta essentia*) genannt werden. Aristoteles weist darauf hin, dass man den obersten Ort auch als „Aither“ bezeichnet, da er ewige Zeit hindurch stetig läuft („*aei thei*“).

Weiter folgert Aristoteles, dass es außerhalb des Himmels keinen Ort und keine Zeit geben kann, da das Göttliche unveränderlich ist und durch nichts anderes bewegt werden kann als das Göttliche selbst. Alle Bewegung benötigt aber einen Beweger, da ansonsten die Bewegung zum Stillstand kommen würde.

Damit ist nach Aristoteles klar, dass jenseits des Himmels das Göttliche selbst – der „unbewegte Beweger“ – für die Drehung des Himmels sorgt. Etwas später

unterscheidet Aristoteles von den natürlichen (=einfachen) Bewegungen die naturwidrigen (=gewaltsamen) Bewegungen², wozu auch die erste Phase der Wurfbewegung zählt.

Damit haben wir einen Abriß der kosmologischen Theorie in *De caelo* gegeben, die in der Tat schon alle Probleme der Wurfbewegung innerhalb der Aristotelischen Theorie beinhaltet. In *Vom Himmel* findet sich auf wenigen Seiten diejenige Theorie des Kosmos, die erst mit der sogenannten Kopernikanischen Revolution abgelöst wird. Das Universum ist von endlicher Ausdehnung. Der Himmel ist eine Sphäre aus dem fünften Element, die von einem unbewegten Bewegter in Rotation gehalten wird. Da das fünfte Element göttlich ist, hat es maximalen Abstand zu unserer Welt, also ist die Erde der Mittelpunkt des Universums und die sublunare Sphäre deutlich getrennt von der Himmelssphäre. Damit finden sich sogar theologische Prinzipien der Scholastik in *Vom Himmel* angelegt.

Wir fassen die Teile der Theorie zusammen, die wir zur Erklärung der Aristotelischen Ballistik benötigen:

- Es gibt natürliche und gewaltsame Bewegung. Beide Formen benötigen einen Bewegter und etwas Bewegtes, die verschieden voneinander sein müssen.
- Natürliche Bewegungen auf der Erde verlaufen geradlinig von unten nach oben oder von oben nach unten.
- Jede natürliche Bewegung kommt von selbst zur Ruhe, wenn der bewegte Körper an seinem natürlichen Ort angekommen ist.
- Natürliche Kreisbewegung kommt nur dem fünften Element zu.

Interessanterweise ist es gerade die Wurfbewegung, die innerhalb der Aristotelischen Philosophie besondere Probleme hervorruft³. Wenn ein Stein beim Wurf die Hand des Werfers verläßt, dann verliert das Bewegte den Bewegter; dennoch bewegt sich der Stein nach unserer Erfahrung weiter. Aristoteles diskutiert die Wurfbewegung in seiner *Physikvorlesung*⁴. Die naheliegende Idee, dass der Werfer neben dem Stein auch noch die Luft als Medium in Bewegung versetzt, die es dann dem Stein ermöglicht, weiter zu fliegen, reicht allein zur Erklärung offenbar nicht aus. Auch das Medium verliert ja den Kontakt mit dem Bewegter und so kann sich auch das Medium nicht weiterbewegen. Aristoteles postuliert vielmehr eine Eigenschaft des Mediums, Bewegung nicht nur aufzunehmen,

² Ebenda 300a20ff.

³ GUSTAV ADOLF SEEK: Die Theorie des Wurfs, Gleichzeitigkeit und kontinuierliche Bewegung. In: Gustav Adolf Seek (Hrsg.): Die Naturphilosophie des Aristoteles. Darmstadt 1975.

⁴ ARISTOTELES: Physikvorlesung. Werke Band 11, Berlin 1995. 266b27-267a20. Insbesondere sind die Abschnitte IV cap. 8 und VIII cap. 10 für die Wurftheorie interessant.

sondern auch abzugeben. Dabei spielt die „Gleichzeitigkeit“ eine entscheidende Rolle, denn das Medium kann nicht gleichzeitig die Bewegungskraft, die es ausübt, und den Bewegungsantrieb, den es erfährt, verlieren. Vielmehr verliert es den Bewegungsantrieb, wenn der Kontakt mit dem Werfer endet, aber es behält die Bewegungskraft, die sie nun an den Stein abgibt. Die Fähigkeit, Bewegung zu vermitteln, nimmt jedoch ab und kommt schließlich zum Stillstand.

Offenbar hat Aristoteles beim Schreiben der *Physikvorlesung* ein Schichtenmodell der Luft vor Augen gehabt. Der Arm des Wurfers vermittelt der ersten Luftschicht die Fähigkeit, Bewegung zu vermitteln – der Werfer aktiviert diese Fähigkeit. Diese erste Luftschicht bewegt nicht nur den Stein, sondern aktiviert auch die nächste, zweite Luftschicht, und so weiter. Erst am Ende des Prozesses geschehen zwei Dinge gleichzeitig: Die vorletzte Luftschicht verliert ihre Antriebsfähigkeit gleichzeitig mit dem Angetriebensein der letzten Luftschicht. Damit kommt dieser Prozess zum Ende. Einen schönen Vergleich hat 1550 Cardano in *De subtilitate* geliefert⁵: 10 Ochs sind in einer Reihe vor einen Karren gespannt. Sie tragen alle ein spitzes Horn auf der Stirn. Wenn der erste, vor dem Karren befindliche, Stier erschreckt wird, stößt er sein Horn in das Hinterteil des nächsten, der wiederum erschrickt sich und stößt in das Hinterteil des dritten, und so weiter. Der Karren steht dabei für den geworfenen Stein, der durch die Ochs weiterbewegt wird.

Zur Frage der Form der Bahnkurve findet man bei Aristoteles keine konkrete Angabe. Der große Mechaniker István Szabó gibt zwar ohne Angabe einer Quelle an⁶, die Wurfbahn nach Aristoteles setze sich aus einer Geraden, einem Kreisabschnitt und einer senkrecht zum Boden verlaufenden Geraden zusammen; ich habe jedoch weder in der *Physikvorlesung* noch in *Vom Himmel* dafür irgendwelche Evidenz gefunden.

Verblüffenderweise findet man in Szabós erstem Buch zur Technischen Mechanik⁷ eine ganz andere Wurfbahn, nämlich die in Abbildung 2 gezeigte. Eine solche Bahn ist mit den Schriften des Aristoteles tatsächlich verträglich, zumal die Kreisbewegung als „göttliche“ Bewegungsform für einen einfachen Wurf vermutlich ausgeschlossen war. Zum Widerspruch zwischen den Aussagen in den beiden Publikationen Szabós tritt nun noch hinzu, dass Szabós Ausführungen in der *Einführung in die Technische Mechanik* zum Aristotelischen Wurf offenbar falsch sind. Er schreibt⁸:

⁵ zitiert nach: GERHARD AREND: Die Mechanik des Niccoló Tartaglia im Kontext der zeitgenössischen Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie. München 1998. S.17.

⁶ ISTVÁN SZABÓ: Geschichte der mechanischen Prinzipien. Basel 1976.

⁷ ISTVÁN SZABÓ: Einführung in die Technische Mechanik. Achte Auflage, 1975. S.2.

⁸ ebenda.

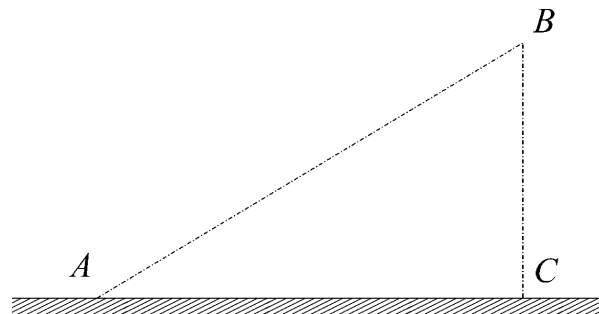


Abb. 2: Aristotelische Wurfbahn.

„Aristoteles beschreibt [...] den Wurf, also die Bahn eines geworfenen Steines, so, daß er geradlinig von A nach B fliegt und dann ‚müde geworden‘ senkrecht herunterfällt.“

Eine solche Aussage ist weder in der *Physikvorlesung*, noch in *Vom Himmel* zu finden, aber sehr wohl in Niccoló Tartaglias Schriften⁹.

Wie auch immer man die Aristotelische Wurfbahn interpretiert: Interessant ist die Tatsache, dass Aristoteles bereits den Einfluss des Widerstandes an der Dichte des Mediums festmacht¹⁰.

3. Weitere ballistische Theorien der Antike

Cardano berichtet in *De subtilitate*¹¹ auch über „die Meinung einiger Alter“ zur Theorie des Wurfes. Demnach eilt die Luft dem geworfenen Stein voran und der Stein muss, um den Zustand des Vakuums zu vermeiden, der Luft in bestimmter Geschwindigkeit hinterhereilen. Wieder präsentiert er ein Ochsenanalogon; diesmal mit nur einem Ochsen vor einem Karren, der die sich bewegende Luft repräsentiert. Der verdünnten Luft entspricht dann das Ochsengeschirr, das den Karren nach sich zieht. Noch ganz in Aristotelischer Philosophie verhaftet argumentiert Cardano aber sofort, dass eine solche Erklärung nicht richtig sein kann, denn was ist der Beweger der Luft? Ist es der Stein, dann würden sich Stein und Luft wechselseitig bewegen. Das kann aber nicht sein, da die Rolle von Beweger und Bewegtem ständig wechseln müsste. Hätte die Luft

⁹ GERHARD AREND: a.a.O. S.169.

¹⁰ ARISTOTELES: *Physikvorlesung*. a.a.O. 215b.

¹¹ GERHARD AREND: a.a.O. S.18.

ein inheräntes Bewegungsprinzip inne, wie es Averroes vermutete, dann würde die Bewegung ewig fortdauern, was gegen alle Erfahrung wäre.

Eine andere Bewegungstheorie findet man in Platons *Timaios*¹², die man „Antiperistasistheorie“ nennt. Unter diesem Namen rangieren Prozesse, in denen zwei gegensätzliche Quantitäten sich (oft paradoxerweise) gegenseitig anfachen. Die betreffende Stelle im *Timaios* beschreibt den Vorgang des Ausatmens. Beim Ausatmen wird von der ausgestoßenen Luft die Luft vor dem Mund verdrängt. Da diese sich nun bewegt, verdrängt sie die nächste angrenzende Luftschicht und so fort. Übertragen auf die Theorie des Wurfes bedeutet dies, dass der sich bewegende Stein Luft verdrängt. Dadurch entsteht hinter ihm ein Raum, in den Luft nachströmt, aber dadurch in den Kontakt mit dem Stein kommt und diesen weiterschiebt, usw. Auch die Antiperistasistheorie ist Aristotelisch unhaltbar, denn die nachströmende Luft bräuchte wieder einen Beweg-er, und bereits Aristoteles selbst lehnt diese Theorie ab¹³.

4. Die Impetustheorien des Mittelalters

Das große Problem der Aristotelischen Wurftheorie liegt in der Zuerkennung einer besonderen Eigenschaft des Mediums, nämlich des Bewegungsprinzips, das es dem Medium ermöglicht, einen durch ihn fliegenden Stein weiter zu befördern, ohne sich selbst zu bewegen. Kritik an dieser Theorie begann dann auch verhältnismäßig früh. Bereits im frühen sechsten Jahrhundert entwickelte der Aristoteleskommentator Iohannes Philoponos aus Alexandrien ein Gegenmodell, dass nichts weniger konstatierte als dass der Werfende nicht dem Medium eine bewegende Kraft verleiht, sondern dem geworfenen Stein¹⁴. Am Beispiel eines Lichtstrahls, der durch ein buntes Glasfenster fällt und einem Körper hinter diesem Fenster dadurch eine andere Farbe verleiht, versucht Philoponos zu begründen, dass unkörperliche Energien, d.h. dem angestrahlten Körper nicht eigene Farbe, hervorgerufen werden können. Also mag auch der Werfer im Stein eine unkörperliche Energie hervorgerufen haben, so dass er sich bewegt, auch wenn er die Hand des Werfers verlassen hat. Diese „Theorie“ des Philoponos wird in verschiedenen Ausprägungen bis in die Neuzeit hinein als „Impetustheorie“ wirken.

Aristoteles hatte behauptet, das Medium sei für die Bewegung des geworfenen Steins notwendig. Nun spielt das Medium keine Rolle mehr, bzw. wird als Quel-

¹² PLATON: Sämtliche Werke, Band III. Darmstadt 2004. 79B.

¹³ ARISTOTELES: Physikvorlesung a.a.O. IV cap. 8 und VIII cap. 10.

¹⁴ ANNELIESE MAIER: Zwei Grundprobleme der scholastischen Naturphilosophie. 3te erweiterte Auflage, Roma 1968, p.121.

le des Widerstandes einer Bewegung gesehen. Das Nachlassen der Bewegung bis zum schließlichen Stillstand des geworfenen Steines bei Aufschlag auf die Erde wird damit erklärt, dass die unkörperliche Kraft „müde“ wird¹⁵.

Was aber ist der „Impetus“? Finden wir bereits hier einen echten physikalischen Ansatz, der in einer Linie zu den modernen physikalischen Theorien eines Galilei oder Newton führt? Aus moderner Sicht erinnert die Theorie des Philoponos vielleicht bereits an eine Art von Übertragung von Energie ($mv^2/2$) oder Impuls (mv), aber eine solche direkte Interpretation ist sicher unzulässig. Wir sind gewohnt, im Rahmen der Newtonschen Mechanik zu denken und wir kennen den Trägheitsbegriff, der bis in die Neuzeit unbekannt war. Die Impetustheorie führt genau so wenig in direkter Linie zur modernen Mechanik wie die Aristotelische Meteorologie nicht in direkter Linie zur modernen Wettervorhersage führt. Dennoch hat die Impetustheorie und selbst Aristoteles so weit in die Moderne hineingereicht, dass man die Entwicklung der Mechanik nicht ohne die Impetustheorie diskutieren kann. Ich bin geneigt, dem Philosophen Klaus-Jürgen Grün zu folgen¹⁶, der die Impetustheorie in den deutschen Idealismus münden lässt, allerdings teile ich nicht dessen Meinung, sie führe *überhaupt nicht* in die moderne Physik. Anneliese Mayer schreibt zwar auch¹⁷:

„Fragen wir uns aber, was diesem impetus in der Auffassung der modernen Mechanik entspricht, so lautet die Antwort: gar nichts.“

aber Gottfried Wilhelm Leibniz war sich der Bedeutung der Impetustheorien durchaus bewußt und er steht ganz sicher an der Wende zur modernen Mechanik und hat ihr wichtige Impulse gegeben. Sucht man nach einer deutschen Bezeichnung für den Impetus, dann bietet sich der Begriff „Schwung“ an, den Leibniz in seinem Manuskript *De usu impetus concepti in machinis*¹⁸ verwendet hat:

*„impetum conceptum Germanice den Schwung usum habere ...“*¹⁹

Wir werden auf Leibniz noch zurück kommen.

Im Mittelalter entwickelt sich aus Philoponos' Theorie eine ganze Reihe von Bewegungstheorien, die man heute sämtlich unter der Bezeichnung Impetustheorie zusammenfasst. Roger Bacon (ca. 1214-1294), Petrus Olivi (1247-1297

¹⁵ MICHAEL WOLFF: Geschichte der Impetustheorie. Untersuchungen zum Ursprung der klassischen Mechanik. Frankfurt/Main 1978, p.67.

¹⁶ KLAUS-JÜRGEN GRÜN: Vom unbewegten Beweger zur bewegendenden Kraft. Der pantheistische Charakter der Impetustheorie im Mittelalter. Paderborn 1999.

¹⁷ ANNELIESE MAYER: a.a.O. p.123.

¹⁸ Niedersächsische Landesbibliothek Ms. LH XXXVIII, Blatt 216. (Über den Gebrauch des von Maschinen aufgenommenen Impetus)

¹⁹ „Dass der empfangene Impetus, zu deutsch Schwung, ...“

(1298?)), Franciscus de Marchia (gest. 1320) sind als frühe Denker zu nennen. Etwa um 1320 beginnt sich eine Manifestation der Impetustheorie zu verbreiten, die von Johannes Buridan (ca. 1300-nach 1358) bei der Kommentierung der *Physikvorlesung* des Aristoteles entwickelt wurde²⁰. Buridan stellt durch Erfahrungen mit verschiedenen Bewegungen von Kreiseln, Bällen, Pfeilen und Windmühlen zuerst fest, dass das Medium als Beweger ausscheidet. Er schreibt²¹:

„Er ist also eine ganz eigentliche vis motrix, nicht nur die species oder similitudo einer solchen, wie die inclinatio Olivis, und auch nicht nur ein Mittelding zwischen bewogender Kraft und Bewegung wie die vis derelicta des Franciscus de Marchia; und er hat nur die Besonderheit gegenüber einer gewöhnlichen virtus motiva, dass er seinem motum inhäriert und es nicht durch Kontaktwirkung bewegt.“

Damit ist der Impetus eine eigene aktive Qualität so wie die Eigenschaft von Körpern, Wärme aufzunehmen. Nach Buridan verlässt der geworfene Stein die Hand mit maximaler Geschwindigkeit. Er verliert von da an Geschwindigkeit, bis er zum Stillstand kommt. Damit steht er in krassem Gegensatz zu seinen Zeitgenossen, die der Ansicht waren, der geworfene Stein würde nach dem Verlassen der Hand schneller werden! Diese skurril anmutende Meinung war die Folge einer Stelle in Aristoteles' *Vom Himmel*, in der es heißt²²:

„Ist die Bewegung ungleichmäßig, so wird es offenbar Steigerung, Höhepunkt und Nachlassen der Bewegung geben. Denn jede ungleichmäßige Bewegung hat Nachlassen, Steigerung und Höhepunkt. Der Höhepunkt ist entweder beim Ausgangspunkt der Bewegung oder beim Zielpunkt oder in der Mitte: bei den naturgemäßen Bewegungen vermutlich beim Zielpunkt, bei den naturwidrigen beim Ausgangspunkt, beim Geschleuderten aber in der Mitte.“

Buridan ist also in seiner Auffassung schon fast modern. Wie Arend anmerkt ist selbst unter den bedeutenden Autoren des 16ten Jahrhunderts nur Tartaglia der gleichen Ansicht wie Buridan²³.

In der Generation nach Buridan sind es insbesondere Oresme und Albert von Sachsen, die die Impetustheorie weiter entwickeln.

Der französische Bischof Nicole Oresme (vor 1330-1382) war einer der bedeutendsten Naturphilosophen und Mathematiker des 14ten Jahrhunderts. Von ihm stammt unter anderem der Beweis für die Divergenz der harmonischen Reihe.

²⁰ GERHARD AREND: a.a.O. p.36.

²¹ zitiert nach: GERHARD AREND: a.a.O. p.37.

²² ARISTOTELES: *Vom Himmel* a.a.O. 288a19ff.

²³ GERHARD AREND: a.a.O. p.42 Fußnote 89.



Abb. 3: Nicole Oresme.

Oresme schlägt erstmals die Brücke zwischen dem Impetus und der Beschleunigung eines Körpers. Beim Beschleunigen eines Körpers wird der Impetus größer, und zwar proportional zur Beschleunigung. Oresme argumentiert mit einem gedachten Schacht durch den Erdmittelpunkt. Fällt ein Körper in diesen Schacht, dann wird er beschleunigt und schießt über den Erdmittelpunkt hinaus. Das sorgt für eine Verzögerung und schließlich für eine Umkehr der Bewegung, so daß der Körper eine oszillierende Bewegung um den Erdmittelpunkt ausführt, bis er schließlich zur Ruhe kommt. Diese „Selbstverstärkung“ des Impetus durch die von ihm erzeugte Beschleunigung erinnert an das Konzept der „toten“ und „lebendigen“ Kräfte bei Leibniz, die dieser in seinen *Specimen Dynamicum* als „vis mortua“ bzw. „vis viva“ bezeichnet²⁴.

Die Impetustheorie Oresmes eignet sich im Gegensatz zur Buridanschen Theorie nicht, um die Bewegung des Himmels zu erklären, denn hierbei treten ja keine (sichtbaren!) Beschleunigungen auf. Daher geht er hier zurück auf den antiken Unterschied zwischen der sublunaren Welt und dem Himmel und postuliert, dass Gott ein Gleichgewicht zwischen beschleunigendem Impetus und bremsenden Widerständen installiert haben muss, woraus letztlich die Gleichmäßigkeit der Himmelsbewegung folgt. Im Gegensatz zu Buridan ist der Impetus bei Oresme kein *naturae permanentis*, der nur durch äußere Widerstände zu

²⁴ GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ: *Specimen Dynamicum*. Hamburg 1982.

vermindern sei, sondern der Impetus verzehre sich durch die Erzeugung von Bewegung²⁵. Würde die Impetustheorie also auch für die Bewegung des Himmels gelten, dann müßte Gott die Bewegung ständig neu anstoßen und damit den Impetus erneuern. Solches ist aber nicht göttlich und damit kann man annehmen, dass der Himmel durch Intelligenzen bewegt.

Während Arend²⁶ in der Impetustheorie Oresmes eine deutliche Verbesserung der Buridanschen Theorie sieht, die bereits in Richtung einer Auffassung des Raumes nach Newton weist, wurde das bereits von Maier bestritten²⁷:

„[Die Bewegungstheorie Oresmes ist] eine höchst komplizierte und unklare Theorie, die zudem voll von Widersprüchen ist und die sich vor allem in keiner Weise mit den allgemein anerkannten mechanischen Grundregeln verträgt.“

Verläßt der geworfene Stein die Hand des Werfers, so beschleunigt er nach Oresme und verlangsamt seinen Flug erst nach einiger Zeit. Wie wir gesehen hatten, beruhte diese Vorstellung auf einer Missinterpretation in Aristoteles' Vom Himmel. Noch der als Albert von Sachsen bekannte Philosoph Albert von Rickmersdorf (auch als Albert von Helmstedt bekannt) (ca. 1316-1390), der in Paris lehrte, läßt die Impetustheorien Buridans und Oresmes nebeneinander gelten, und zwar auch da, wo sie sich offensichtlich widersprechen. Erst Marsilius von Inghen (zw. 1335 und 1340-1396), erster Rektor der Universität Heidelberg, gab der Impetustheorie neue Impulse und brachte sie in eine Form, die bis ins 16te Jahrhundert hinein prägend blieb. Danach ist der Impetus von der eigentlichen Bewegung verschieden, von permanenter Natur, aber nicht anhaltend. Erstmals wird hier eine absolute Antwort nach der kategoriellen Einteilung bewusst nicht gegeben, sondern Marsilius stellt fest, dass es auf den Standpunkt ankommt, von dem aus man die Bewegung betrachtet. In der Sprache der Scholastik ist der Impetus an sich eine Qualität der dritten Art, d.h. eine einfache Sinnesqualität. Aus der Sicht des Steines eine Qualität erster Art, d.h. ein habitus, eine erworbene Eigenschaft, und aus seiner Funktion als Beweger eines Körpers gehört er in die Kategorie actio. Marsilius unterscheidet zwischen natürlichem und gewaltsamem Impetus; der natürlich bewegte Körper nach unten und oben. Der gewaltsame Impetus unterteilt sich noch in den, der geradlinige Bewegungen hervorruft, und den für kreisförmige Bewegungen. Die Frage nach der anfänglichen Beschleunigung entscheidet Marsilius nicht²⁸.

²⁵ GERHARD AREND: a.a.O. p.43.

²⁶ GERHARD AREND: a.a.O. p.44.

²⁷ ANNELIESE MAIER: Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert. Rom 1966.

²⁸ GERHARD AREND: a.a.O. p.46f.

Die den heutigen Naturwissenschaftler brennende Frage nach der eigentlichen Wurfbahn war für die Philosophen leider kein Gegenstand von Interesse. Es ging eben um das Wesen der Bewegung an sich und nicht um naturwissenschaftliche Fragestellungen. Nur so ist zu verstehen, dass – wie wir gesehen haben – aus den Schriften des Aristoteles zwei verschiedene Wurfbahnen ableitbar sind. Albert von Sachsen beschreibt die Bahn klar als dreiteilig: geradlinig zu Beginn durch gewaltsame Bewegung, dann übergehend in einen Kreisbogen, wobei gewaltsame und natürliche Bewegung vorhanden sind, und schließlich eine nur von natürlicher Bewegung charakterisierte vertikale Gerade bis zum Aufschlag des Steins auf dem Boden²⁹.

Im 15ten Jahrhundert beginnt dann in Italien eine Hinwendung zur Konstruktion von Maschinen; Praktiker versuchen sich an mechanischen Apparaten aller Art. Herausragender italienischer Praktiker dieser Epoche ist Leonardo da Vinci (1452-1619), dessen Verständnis des Impetus auf den Ausführungen des Buridanschülers Albert von Sachsen basiert³⁰, die er aber ähnlich wie Nikolaus von Kues (Cusanus) (1401-1464) in der dritten Phase des Wurfes dadurch modifiziert, dass er die Bewegungsform des geworfenen Steines nicht von der Schwere allein, sondern auch von der Form des Steines abhängig macht. Cusanus legt seine Impetustheorie in Form eines Gesprächs über ein Spiel in seinem zweiteiligen *Gespräch über das Globusspiel* dar³¹. Bei diesem Spiel wird eine Holzkugel *K* verwendet, die nach Abbildung 4(b) durch eine gedachte gleich große Kugel *K'* eine Aushöhlung enthält.

Gespielt wird auf einem Brett, das konzentrische Kreise enthält. Die Kugel soll nun so auf das Spielbrett geworfen werden, dass sie möglichst nahe am Zentrum zum Stillstand kommt. Durch die Unsymmetrie der Kugel bewegt diese sich zuerst nahezu geradlinig, schlägt dann aber eine kreisförmige Bewegung um das Zentrum des Spielbrettes ein, dem sie sich in spiralförmigen Kurven nähert. Cusanus hält fest, dass eine perfekte Kugel auf einer gleichmäßigen Oberfläche sich immer gleichartig verhalten würde; daher würde eine Kugel, einmal in Bewegung gesetzt, sich immer weiter bewegen³². Über die Bahn schreibt er³³:

„Bei größerem Antrieb erscheint die beschriebene Linie gerader und bei einem geringeren entsprechend mehr gekrümmt. Darum sind bei Beginn der

²⁹ ALISTAIR CAMERON CROMBIE: The History of Science From Augustine to Galileo. New York 1995, p.86f.

³⁰ MICHAEL WOLFF: a.a.O. p.256.

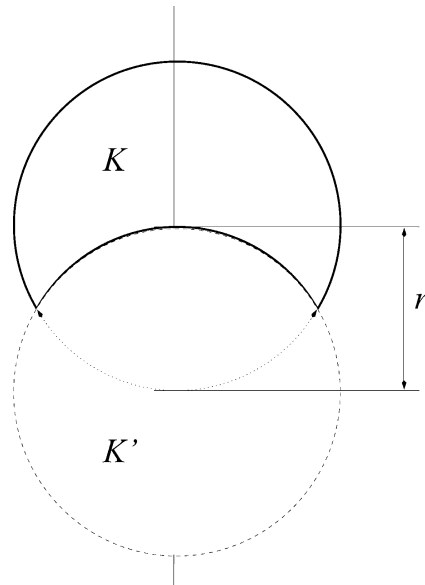
³¹ NIKOLAUS VON KUES: Dialogus de ludo globi / Gespräch über das Globusspiel. in: Philosophisch-Theologische Werke. Band 3. Hamburg 2002.

³² NIKOLAUS VON KUES: a.a.O. p.23.

³³ NIKOLAUS VON KUES: a.a.O. p.5f.



(a) Nikolaus von Kues.



(b) Der Cusanussche „Globus“.

Abb. 4: Cusanus und der Globus des Globusspiels.

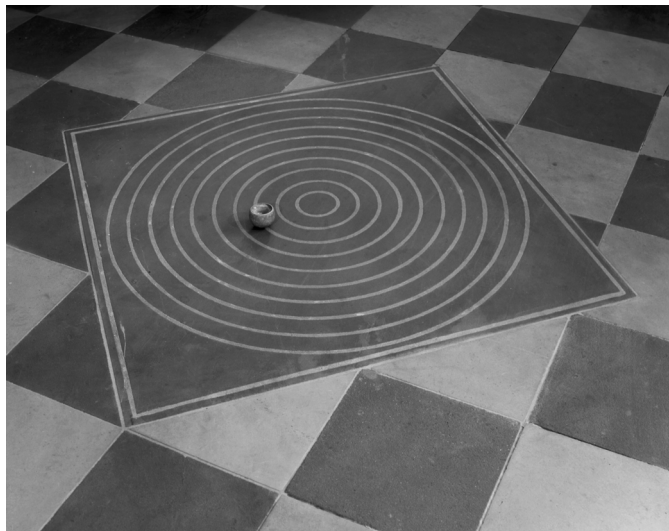


Abb. 5: Das Spielbrett.

Bewegung, wenn der Antrieb frischer ist, die Linien der Bewegung gerader als wenn die Bewegung nachläßt. Denn angetrieben wird der Globus nur zu gerader Bewegung. Bei stärkerem Antrieb wird daher dem Globus mehr Gewalt angetan, weg von seiner Natur, daß er auch, soviel das gemacht werden kann, sich geradlinig wider seine Natur bewegt. Bei geringerem Antrieb wird ihm aber Gewalt zur Bewegung angetan und die natürliche Bewegung ist weniger gewaltsam. Sondern diese Bewegung folgt der natürlichen Eignung seiner Form.“

Ohne Zweifel gelangt die Impetustheorie Cusanusscher Prägung über Leonardo da Vinci zu den „Mechanikern“ Italiens, namentlich Cardano, Tartaglia und nicht zuletzt Galileo Galilei³⁴.

5. Der Siegeszug der Feuerwaffen

Mit Leonardo da Vinci sind wir in einer Zeit angekommen, in der Feuerwaffen eine herausragende Rolle in der Kriegführung bereits übernommen haben. Kanonen, mit glühenden Eisen gezündet und mit Bolzen geladen, finden sich in Abbildungen bereits im frühen 14ten Jahrhundert³⁵. Die militärischen Misserfolge der Engländer im späteren Verlauf des Hundertjährigen Krieges (1337-1453) lassen sich bereits auf die Ignoranz der englischen Regierung nach dem Tod von König Henry V. im Jahr 1422 den neuen Feuerwaffen gegenüber zurückführen³⁶. Es ist auch zu bedenken, dass sich die ersten Rezepte für Pulver, basierend auf einer Mischung von Salpeter, Schwefel und Holzkohle, in den Schriften des Roger Bacon finden, der sie zwischen 1257 und 1265 verfasste. Kaiser Maximilian I. (1459-1519) war als glühender Verehrer von Ritterturnieren der „letzte Ritter“, sah aber auch die Notwendigkeit und Bedeutung einer modernen Artillerie³⁷.

Die italienischen Autoren des 16ten Jahrhunderts verlegen die Erfindung und erste Verwendung von Feuerwaffen nach Deutschland³⁸, von wo aus sie schnell in Italien Verbreitung fanden. Die Berufsstände der Büchsenmacher und Kanongießerei entstanden und reiche Handelsstädte schützten ihren Reichtum durch kanonenbewehrte Stadtmauern. Gezielt wurde nach der Erfahrung. Eine wis-

³⁴ PIERRE DUHEM: Études sur Léonard de Vinci. Paris 1906-1913.

³⁵ BERNHARD RATHGEN: Das Geschütz im Mittelalter. Berlin 1928.

³⁶ KELLY DeVRIES: Facing the New Technology: Gunpowder Defenses in Military Architecture Before the *Trace Italienne*, 1350-1500, p.39. in: Brett D. Steele & Tamera Dorland: The Heirs of Archimedes. Cambridge, Mass. 2005.

³⁷ HERMANN WIESFLECKER: Maximilian I. München 1991.

³⁸ GERHARD AREND: a.a.O. p.53.

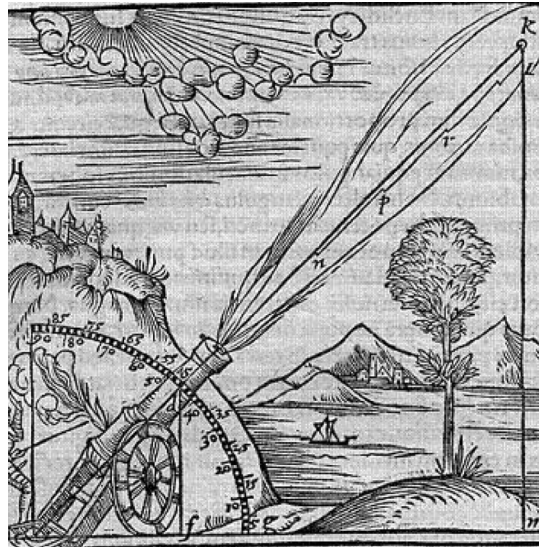


Abb. 6: Santbechs Flugbahn.

senschaftliche Betrachtung der Ballistik in unserem heutigen Sinne fand nicht statt bevor Niccoló Tartaglia im Jahr 1537 in seinem wissenschaftlichen Erstlingswerk *Nova Scientia*³⁹ den Grundstein zur Entwicklung der Ballistik legte.

Da nun Feuerwaffen schlacht- oder gar kriegsentscheidend waren, traten die philosophischen Fragstellungen nach dem Wesen des Impetus in den Hintergrund und wurden von praktisch relevanten Fragen abgelöst. Das waren Fragen nach der maximalen Schussweite und der sie beeinflussenden Größen, nach der genauen Einstellung des Schusswinkels, nach der maximalen Wirkung im Ziel und nach der Art des Pulvers und der Form und des Materials der Geschosse⁴⁰. Eine Art praktischer Ballistik wurde u.a. von Sebastian Münster (1488-1552) und Daniel Santbech (um 1560) entwickelt. Dabei kommt es nicht auf die Flugbahn oder andere Größen an, sondern es geht um reine Erfahrungsregeln für die Einstellung des Schusswinkels, um ein Ziel in bestimmter Entfernung zu treffen. Im

³⁹ eigentlich: „Inventione de NICOLÒ TARTAGLIA/ Brisciano intitulata Scientia Noua diuisa in V. libri,/ nel Primo di quali se dimostra theorica-/ mente, la natura, & effetti de corpi/ egualmente graui, in li dui con/ trarii moti che in essi puon/ accadere, & de lor con/ trarii effetti“.

⁴⁰ GERHARD AREND: a.a.O. p.55.



Abb. 7: Sebastian Münster.

Jahr 1561 publizierte Santbech das Buch *Problematum astronomicorum et geometricorum sectiones septem*, in dem er auch ballistische Probleme diskutierte. Er bemerkt die Bedeutung der Euklidischen Geometrie für Probleme der Entfernungsmessung und nähert die Flugbahn eines Geschosses durch zwei Geraden nach Abbildung 6 an, obwohl er weiß, dass die eigentliche Flugbahn gekrümmt ist. Durch diese Näherung ist er in der Lage, Schussweiten mit Hilfe von Sinus-Tabellen zu berechnen. Dennoch bleibt diese „mathematische“ Ballistik nur ein Hilfsmittel und wird nicht zur eigentlichen Ballistik gerechnet, die ja nur eine Erfahrungswissenschaft sein soll. In diesem Licht gesehen ist klar, dass die Berechnungen von Schussweiten im Rahmen von Problemen unter zahlreichen anderen Problemen der Angewandten Mathematik auftauchen.

Der Kosmograph, Humanist und Hebraist Sebastian Münster, dessen Portrait (seitenverkehrt) den alten 100 DM-Schein zierte, ist ebenfalls zu den Wissenschaftlern zu zählen, die die Ballistik als Übungsfeld für Aufgaben der praktischen Mathematik ansahen. Dies spricht schon aus dem Titel des Werkes, in dem Münster die Ballistik behandelt: *Rudimenta mathematica* aus dem Jahr 1551. Folgen wir Arend⁴¹, dann hat Münsters Text sogar Santbech als Quelle gedient. Auf nur wenigen Seiten beschreibt Münster das für Kanoniere scheinbar so wichtige rechtwinklige Dreieck, wie es in Abbildung 6 bei Santbech gezeigt ist.

⁴¹ GERHARD AREND: a.a.O. p.64.

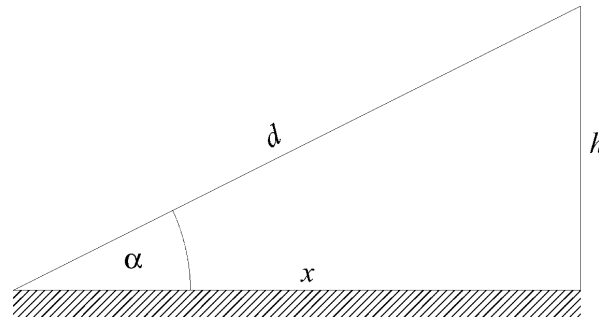


Abb. 8: Bahngeometrie nach Münster.

Münster bezieht seine Ausführungen ausdrücklich auf Bombarden und Katalpulte, die im 16ten Jahrhundert noch in Gebrauch waren, um bei Belagerungen faulende Tierkadaver in Städte zu schleudern oder brennendes Pech einzubringen. Am Beispiel des Schusses mit einer Bombarde erläutert er sehr genau den Umgang mit dem Quadranten zur Messung des Inklinationswinkels und die Berechnungen, die zu einem erfolgreichen Schuss führen⁴². Der Schussbahn zugrundegelegt wird die Form eines rechtwinkligen Dreiecks, wobei x die Schussentfernung bezeichnet, h die (maximale) Höhe des Geschosses senkrecht über dem Ziel und d die geradlinige Entfernung vom Geschütz zu diesem höchsten Bahnpunkt. Bezeichnen wir mit α den Schusswinkel (Elevationswinkel), dann gilt offenbar

$$x(\alpha) = d \cos \alpha.$$

Münster geht offenbar davon aus, dass die Länge der eigentlichen Flugbahn, d , aus Erfahrung bekannt ist⁴³. Es werden nun zwei Problemfälle diskutiert: (1) d und x sind gegeben und α ist gesucht, und (2) d und α sind gegeben und die Zielentfernung x ist zu berechnen.

Es ist aus dem Münsterschen Text unmittelbar klar, dass er die dreieckige Bahngeometrie mit einer geraden Flugbahn, auf der das Geschoss über dem Ziel zum Stillstand kommt und dann senkrecht nach unten fällt, lediglich als Idealisierung angesehen hat. Besonders praxisrelevant ist diese Idealisierung beim Fall des Schusses auf ein hochliegendes Ziel, was sich z. Bspl. auf einem Burgberg befindet. Diesen Fall hat Münster durchaus korrekt beschrieben.

⁴² GERHARD AREND: a.a.O. hat den betreffenden Münsterchen Text im Original abgedruckt und eine Übersetzung ins Deutsche angefertigt.

⁴³ GERHARD AREND: a.a.O. p.75.

Durch die Arbeiten von praktischen Ballistikern wie Münster und Santbech wurde jedenfalls das Postulat einer anfänglich geradlinigen Bewegung eines Geschosses weiter manifestiert⁴⁴ und hält sich bis über das 16te Jahrhundert hinaus. Erst Tartaglia ist hier zumindest in der Theorie überlegen und begründet die wissenschaftliche Ballistik.

6. Tartaglia und Galilei

Niccoló Tartaglia (1499-1557) ist in der Mathematikgeschichte eine Berühmtheit durch seine Lösungsmethoden von kubischen Gleichungen und seinen Kampf gegen Cardano, der seine Methoden ohne jede Nennung des Urhebers verwendet. Niccoló wird in Brescia als Sohn eines Postreiters geboren, der stirbt, als der Sohn sechs Jahre alt ist. Die Mutter hat große Probleme, ihre insgesamt vier Kinder durchzubringen, und so wächst Niccoló in Armut heran. Nach anfänglichem Unterricht, der aber nicht weiter bezahlt werden kann, bringt sich der Knabe selbst Lesen und Schreiben bei. Im Jahr 1512 wird Brescia durch einen Angriff der Franzosen verwüstet und die Familie zieht sich hilfessuchend in den Dom zurück, der jedoch geplündert wird, wobei Niccoló schwer verletzt wird. Er selbst hat darüber in einer Autobiographie am Ende des Buches VI seiner *Quesiti et inventioni diverse* aus dem Jahr 1546 berichtet⁴⁵:

„In dieser Kirche schlugen sie mir in Anwesenheit meiner Mutter 5 lebensgefährliche Wunden, 3 auf dem Kopf, daß man bei jeder die Hirnsahne sehen konnte, und zwei ins Gesicht. Würde der Bart sie nicht verbergen, sähe ich aus wie ein Monstrum.“

Niccoló überlebt und behält einen starken Sprachfehler zurück, was ihm den Namen Tartaglia – der Stammer – einbringt, den er sein Leben lang beibehält.

In allen intellektuellen Belangen ein Autodidakt, publiziert Tartaglia im Jahr 1537 das Buch *Nova Scientia*⁴⁶, 14 Jahre vor der Publikation des Münsterschen Buches. Über Münster hinausgehend entwirft Tartaglia eine in sich stimmige Theorie der Ballistik, die er analog zu Euklids Elementen, deren Autor er verehrt, aus Axiomen aufzubauen sucht. Dabei ist er der erste seit Albert von Sachsen, der klare Aussagen zur Form der Flugbahn macht. Für uns interessant ist auch noch die 1546 erschienene Veröffentlichung *Quesiti et inventioni diverse*. Hier stellen Gesprächspartner dem „Nicolo“ Fragen verschiedenster Qualität,

⁴⁴ ebenda p.76.

⁴⁵ Übersetzung nach GERHARD AREND a.a.O. p.90.

⁴⁶ *Inventione de NICOLO TARTAGLIA/ Brisciano intitolata Scientia Noua diuisa in V. libri./ nel Primo di quali se dimostra theorica-/ mente, la natura, & effetti de corpi/ egualmente graui, in li dui con/ trarii moti che in essi puon/ accadere, & de lor con/ trarii effetti.*



Abb. 9: Niccoló Tartaglia.



Abb. 10: Nova scientia .

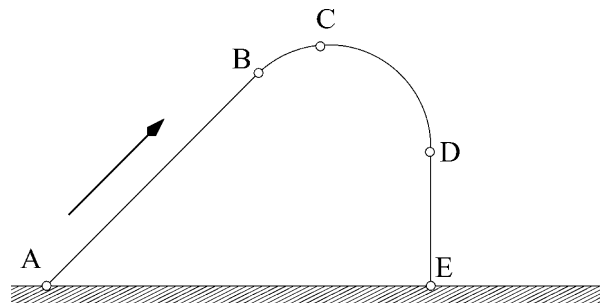


Abb. 11: Flugbahn nach Tartaglia.

die Nicolo dann sachkundig beantwortet und häufig neue Gedanken („inventioni“) dazu mitteilt⁴⁷. Die ersten drei Bücher der *Quesiti* sind der Ballistik gewidmet, wobei die ballistische Theorie der *Nova Scientia* abgerundet wird.

So sehr uns die axiomatische Theorie der Ballistik bei Tartaglia anspricht – wir sind zu sehr von der Schönheit eines axiomatischen Aufbaus gefangen – es fehlt noch an theoretischen Konzepten von Naturgesetzen wie etwa der Trägheit. Daher ist Tartaglias Theorie zwar ein Meilenstein in der Geschichte der Ballistik und markiert in der Tat die Geburtsstunde dieser theoretischen Wissenschaft, Tartaglias Folgerungen sind jedoch zumeist unbrauchbar.

So gibt er, wie Albert von Sachsen, die Flugbahn als aus drei Teilstücken zusammengesetzt an: Eine Gerade, die in ein Kreissegment übergeht, das wiederum in eine vertikale Gerade mündet, siehe Abbildung 11. Tartaglia folgert, dass die Geschwindigkeit des Projektils am Punkt D am kleinsten ist. Auf dem Weg von C nach D wird das Projektil in seiner Theorie langsamer. Als Grund für das Nachlassen der Geschwindigkeit und das schließliche Herunterfallen des Projektils gibt Tartaglia an, das Geschoss sei „müde“, „faul“, „träge“ oder „traurig im Gemüt“. Gleichwohl weiß Tartaglia, dass die Geschossbahn nirgends wirklich gerade verläuft, da das Projektil überall auf seiner Bahn zum Erdzentrum hin gezogen wird. Auch ist ihm klar, dass zwei Körper nicht auf zwei parallelen Geraden zur Erde fallen, weil die Erdkrümmung solches verhindert. Solche vereinfachenden Annahmen sind aber zulässig, da die Abweichungen mit dem Auge nicht wahrnehmbar sind⁴⁸. Die weiteste Schussentfernung wird nach Tartaglia bei einem Schusswinkel von $\alpha = 45^\circ$ erreicht.

⁴⁷ GERHARD AREND: a.a.O. p.94.

⁴⁸ GERHARD AREND: a.a.O. p.168.

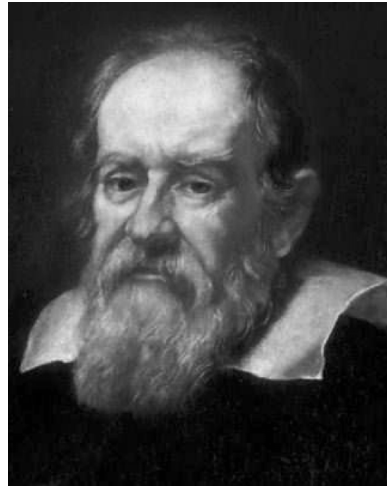


Abb. 12: Galileo Galilei.

Noch immer ist Tartaglia in gewisser Weise in Aristotelischer Physik gefangen. Der Typ der Bewegung auf der Geraden und noch auf dem Kreisbogensegment ist der „*motus violentus*“. Das Herunterfallen zur Erde von D nach E findet im „*motus naturalis*“ statt. Diese beiden Modi der Bewegung sind für Tartaglia unvereinbar, d.h. an eine zusammengesetzte Bewegung aus einer beschleunigten und einer verzögernden kommt einfach nicht in Frage; hier wird sich erst Galilei befreien.

Galileo Galilei (1564-1642) ist ein Schüler des Ostilio Ricci, der wiederum aus der Schule des Tartaglia stammt. Der für die Ballistik entscheidende Durchbruch in den Arbeiten Galileos findet sich in den *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*⁴⁹ aus dem Jahr 1638. Hier findet sich der Satz:

Ein gleichförmig horizontaler und zugleich gleichförmig beschleunigter Bewegung unterworfenen Körper beschreibt eine Halbparabel.

Man kann die Bedeutung Galileos für die Entwicklung der Mechanik gar nicht überschätzen⁵⁰, aber für die Ballistik war die Entdeckung der „wahren“ Flugbahn in einem reibungsfreien Medium ein Jahrhundertereignis.

⁴⁹ GALILEO GALILEI: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. Darmstadt, 1973

⁵⁰ Eine vorzügliche wissenschaftliche Biographie Galileos ist: STILLMAN DRAKE: Galileo at work. Chicago, 1978.

Leider spielt die Reibung bei den Feuerwaffen eine sehr entscheidende Rolle. Nach Galileos Theorie wird die maximale Schussweite bei einem Schusswinkel von $\alpha = 45^\circ$ erreicht, aber die praktischen Ballistiker wussten, dass das im Feld nicht stimmte. Trotzdem blieben Schusstafeln noch lange Zeit in Gebrauch, die mit Hilfe der Galileischen Theorie berechnet wurden.

7. Newton und die Modellierung des Luftwiderstandes

Zahlreiche physikalische Gesetze werden heute nach Isaac Newton (1642-1727) genannt. Immer noch gehört es zur tradierten Lehrmeinung, dass das Widerstandsgesetz, nach dem die Widerstandskraft W proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist,

$$W \sim v^2,$$

von Newton stammt. Diese Lehrmeinung ist nicht haltbar und war es nie. In Newtons berühmtesten Buch *Philosophiæ naturalis principia mathematica* aus dem Jahr 1687 findet man die Theorie reibungsbehafteter Fluide in Buch II. Dieses Buch II, das in der zweiten Auflage der *Principia* 1713 wesentlich erweitert wurde, lässt den heutigen Leser verwirrt zurück. Clifford Truesdell urteilte hart, aber realistisch⁵¹:

Das zweite Buch [...] ist [...] fast vollkommen eigenständig und beinahe ganz falsch.

Im zweiten Buch findet sich unter anderem die Behauptung, ein widerstandsoptimales Schiff hätte einen stumpfen Bug. Wie ein Experimentator wie Newton diesem Ergebnis seiner Berechnungen trauen konnte, wird sein Geheimnis bleiben. In Buch II befinden sich auch Newtons Ausführungen zu verschiedenen Widerstandsmodellen⁵². Newton postuliert dort keineswegs „sein“ Widerstandsgesetz, sondern er untersucht verschiedene Modelle, nämlich

$$\begin{aligned} W &\sim v \\ W &\sim v^2 \\ W &\sim v + v^2. \end{aligned}$$

Die Berechnung der Bahnkurve gelingt Newton allerdings nur unter der Annahme $W \sim v$. Ein bedeutendes Resultat in der *Principia* ist allerdings die korrekte

⁵¹ ISTVAN SZABÓ: Geschichte der mechanischen Prinzipien. 3te Auflage, Basel, Boston, Berlin 1996, S.152.

⁵² ISAAC NEWTON: The Principia. Übersetzt und kommentiert von I. Bernard Cohen und Anne Whitman, Berkeley, Los Angeles, London, 1999.

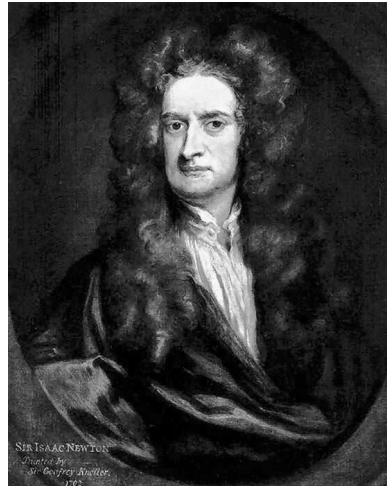


Abb. 13: Isaac Newton.

Lösung eines sogenannten inversen Problems: Ist die Flugbahn eine Parabel, dann muss das Medium notwendig reibungsfrei sein.

Einen Abriss der Geschichte der Reibungstheorien innerhalb der Ballistik gibt Hall⁵³. Bereits ab 1669 experimentiert Christian Huygens und versucht sich an einer passenden Theorie. Er findet Argumente für das Gesetz $W \sim v^2$, während Robert Hook etwa 1668 aus Experimenten $w \sim v$ favorisiert. Im Jahr 1674 veröffentlicht Robert Anderson das Buch *The genuine use and effects of the gunne* und stellt lapidar fest, dass Reibungskräfte vernachlässigbar seien. Er wird daraufhin insbesondere von James Gregory attackiert, der eine gedrehte Galileische Parabel als „wahre“ Flugbahn unter Reibungseinfluss postuliert.

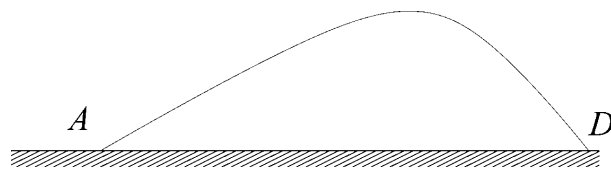


Abb. 14: Gedrehte Parabel nach Gregory.

⁵³ A.R. HALL: *Ballistics in the seventeenth century*. Cambridge, 1952.

Wirklich brauchbare Aussagen über den Widerstand in Fluiden ließen bis ins 19te Jahrhundert auf sich warten.

8. Robins und Euler

Im Jahr 1742 publiziert der englische Mathematiker, Ingenieur und Festungsbauer Benjamin Robins (1707-1751) das kleine Buch *New principles of gunnery: containing the determination of the force of gunpowder, and an investigation of the difference in the resisting power of the air to swift and slow motions*. Robins ist nicht nur ein Anhänger Newtons, sondern auch ein gediegener Praktiker⁵⁴. Robins schoss aus Vorderladermusketen aus unterschiedlicher Entfernung auf Papierbahnen und stellte fest, dass eine Kugel bei einer Entfernung von 760 yards (ca. 695 Meter) ganze 100 yards (ca. 91 Meter) nach links abdriftete. Er vermutete, dass durch die Drehung der Kugel die Druckverhältnisse um das Geschoss so beeinflusst werden, dass die Kugel in fast beliebigen Kurven flog. Diese Entdeckung wurde später als Magnus-Effekt bekannt, als Heinrich Gustav Magnus im Jahr 1860 in der Arbeit *Über die Abweichung der Geschosse* diesen Effekt beschrieb. Erst 1877 gelang es Lord Railegh, den Effekt theoretisch zu erklären, und zwar ganz so, wie Robins es bereits vermutet hatte. Robins plädierte daher für den Einsatz der damals neuen Gewehre, mit denen an Stelle von Kugeln zylindrische Projektile verschossen werden konnten, deren Flugbahn immer in der Abschussebene liegen musste⁵⁵.

Robins ist auch der Erfinder des ballistischen Pendels. Schießt man aus nächster Nähe auf das Pendel, so lässt sich aus dem Pendelausschlag mit Hilfe Newtonscher Mechanik die Mündungsgeschwindigkeit berechnen. Dies geschieht nicht, wie man vielleicht zuerst annehmen kann, mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, denn viel Energie geht in die Deformation des Geschosses und der Prallplatte. Mit dem Impulserhaltungssatz wird die Berechnung jedoch möglich, wenn man die Daten des Pendels kennt. Schon Daniel Bernoulli hatte in seiner *Hydrodynamica* 1738 die Mündungsgeschwindigkeit einer mit Druckluft betriebenen Kanone berechnet. Die Robinsschen Experimente verifizierten diese Rechnungen. Robins verwendete das Pendel zu Studien des Luftwiderstandes, in dem er aus verschiedenen Entfernungen auf das Pendel schoss und auf die Geschwindigkeit der Geschosse zurückschloss. Seine empirisch gewonnenen Formeln zum Widerstand bildeten die Grundlage aller weiteren Arbeiten zur

⁵⁴ BRETT D. STEELE: Muskets and Pendulums: Benjamin Robins, Leonhard Euler, and the Ballistics Revolution. *Technology and Culture*, 35:2, 1994, pp.348-382.

⁵⁵ ROBINS legte seine Ideen im Jahr 1747 unter dem Titel *On the nature and advantage of rifled barrel pieces* der Royal Society vor, siehe ebenda S.364.

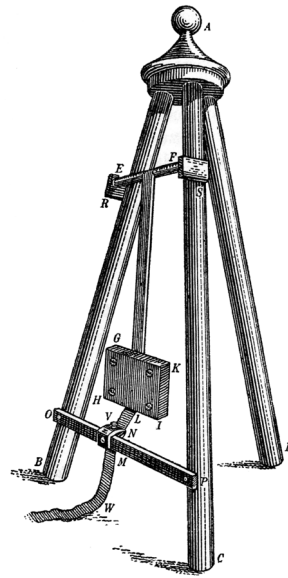


Abb. 15: Ballistisches Pendel.



Abbildung 16: Leonhard Euler

mathematischen Analyse von Luftwiderstand in der Ballistik. Er entdeckte auch, dass der Widerstand bei sehr schnellen Projektilen deutlich stieg und entdeckte damit den Wellenwiderstand in transonischer, d.h. schallnaher, Strömung.

Robins ist auch der erste, der sich mit Problemen der inneren Ballistik beschäftigt hat. Er hatte die Idee, die Kanone als Wärmekraftmaschine aufzufassen und ist somit ein früher Vorläufer der Thermodynamiker. Er erkannte, dass die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve innerhalb des Geschützrohres proportional zur geleisteten Arbeit ist.

Als Leonhard Euler (1707-1783) in den Diensten Friedrichs II stand und dieser ihn um Rat bei ballistischen Problemen bat, übersetzte Euler kurzerhand Robins' Buch ins Deutsche. Obwohl Robins 1739 in seiner Arbeit *Remarks on M Euler's treatise of motion* Euler scharf und gallig angegriffen hatte, wusste Euler das Robinssche Büchlein über die Ballistik zu schätzen. Allerdings standen Robins nicht die Geistesgaben Eulers zur Verfügung und schon gar nicht die neue Mechanik, die dieser auf Basis der Differential- und Integralrechnung entwickelt hatte. Euler begnügte sich nicht mit der simplen Übersetzung des Buches, sondern fügte Zusätze und Anmerkungen hinzu, in denen er einige Fehler Robins korrigierte (und neue machte), aber auch wirklich neue Resultate beibrachte. Die eigentliche mathematische Durchdringung der Ballistik und damit die Aufnahme der Ballistik als Teildisziplin der modernen Mathematik ist ganz und gar Euler zu verdanken. Eulers erster Biograph, Nicolaus Fuss, berichtet⁵⁶:

Der König hatte Herrn Eulers Meinung über das beste in dieses Fach schlagende Werk verlangt. Von Robins, der Eulers Mechanik, die er nicht verstand, einige Jahre vorher auf eine grobe Art angefallen hatte, waren neue Grundsätze der Artillerie im englischen erschienen, die Herr Euler dem König lobte, indem er sich zugleich anheischig machte, das Werk zu übersetzen und mit Zusätzen und Erläuterungen zu begleiten. Diese Erläuterungen enthalten eine vollständige Theorie der Bewegung geworfener Körper und es ist seit 38 Jahren nichts erschienen, das dem, was Herr Euler damals in diesem schweren Theile der Mechanik getan hat, an die Seite gesetzt werden könnte. Auch ward der Werth dieses herrlichen Werkes allgemein anerkannt. Ein aufgeklärter Staatsmann, der französische See- und Finanzminister Turgot, ließ es ins französische übersetzen und in den Artillerieschulen einführen; und bey nahe zu eben der Zeit erschien eine englische Übersetzung in der größten typographischen Pracht, die englische Druckereyen einem Werk nur geben können. Indem Herr Euler in dieser Übersetzung, wo es immer nur thunlich war, Herrn Robins Gerechtigkeit wiederfahren lässt,

⁵⁶ Leonhardi Euleri Opera Omnia, series I, vol.I.

verbessert er, mit einer seltenen Bescheidenheit, dessen Fehler gegen die Theorie, und alle Rache, die er wegen des alten Unbills an seinem Gegner nimmt, besteht darinn, dass er dessen Werk so berühmt macht, als es ohne ihn nie geworden wäre.

Euler vervierfachte so den Umfang des Robinsschen Buches und publizierte sein Werk unter dem Titel *Neue Grundzüge der Artillerie* im Jahr 1745. Das Buch wurde kurz darauf ins Englische und Französische übersetzt. Die innere und äußere Ballistik ist darin mit Hilfe der Infinitesimalmathematik fast vollständig entwickelt. Mit der nachfolgenden Arbeit *Recherches sur la véritable courbe que d'écrivent les corps jettés dans l'air ou dans autre uide quelconque*⁵⁷ steht auch die Differentialgleichung der äußeren Ballistik fest. Beschreibt $\alpha \mapsto v(\alpha)$ die Parametrisierung der Geschwindigkeit mit dem Bahnwinkel, $v \mapsto W(v)$ das Widerstandsgesetz und G das Gewicht des Geschosses, so gilt

$$\frac{dv}{d\alpha} = \left(\frac{W(v)}{G} + \sin \alpha \right) \frac{v}{\cos \alpha}.$$

Als Anfangsbedingung dient dabei die Mündungsgeschwindigkeit $v(\alpha_0)$ bei einem Abschusswinkel α_0 , die man mit Hilfe des ballistischen Pendels experimentell ermitteln kann. Diese Differentialgleichung ist nichtlinear und daher einer direkten Lösung unzugänglich. Euler gab nicht nur Näherungslösungen für kleine Geschwindigkeiten, bei denen die Reibung keine Rolle spielt, sondern ersann auch eine Näherungsmethode, in dem er die Flugbahn durch kleine Geradenstückchen annäherte. Auch auf dem Gebiet der inneren Ballistik gab es

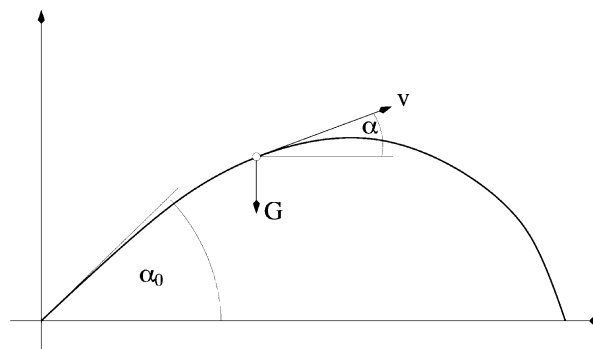


Abb. 17: Flugbahn nach Euler.

⁵⁷ Eneström Nr.217.

durch Euler Fortschritte. So bezog er etwa den Einfluss der Zündbohrung auf die Druckentwicklung im Rohr in Betracht.

Epilog

Mit dem Erscheinen des Robinsschen Buches, spätestens jedoch nach den Eulerschen Publikationen zur Ballistik, musste den Militärapparaten klar geworden sein, dass das Schießen mit Gewehren deutlich effektiver ist als das Schießen mit Musketen, die Bleikugeln verschossen. Auf Basis von Eulers *Neue Grundsätze der Artillerie* hätte man zudem neue Schussweitentafeln berechnen können, die den bis dahin genutzten Tabellen weit überlegen gewesen wären. Beides war in Europa nicht der Fall, sieht man von der Artilleriereform 1760 in Frankreich ab. Hall⁵⁸ und andere haben vermutet, dass die Zurückhaltung des Militärs damit begründet werden konnte, dass die Produktionstechniken zur Herstellung moderner Gewehre noch nicht ausgereift waren, weshalb bei Verwendung von ungenau produzierten Gewehren eine exakte Theorie sinnlos gewesen sei. Dieser Vermutung ist heute klar zu widersprechen, wie z.B. Steele⁵⁹ gezeigt hat. Welchen hohen technischen Stand die Gewehrproduktion im 18ten Jahrhundert erreichte hat Merritt Roe Smith⁶⁰ am Beispiel von Gewehrschmieden in Nordamerika eindrucksvoll nachgewiesen. In der Tat nahm die amerikanische Seite im Bürgerkrieg die wissenschaftlichen Erkenntnisse Europas ernst und produzierte Kanonen und Gewehre, die sich durch ungeahnte Trefferquoten auszeichneten, während die gegnerische Seite immer noch mit Musketen kämpfte. Das europäische militärische System befand sich einfach in einem Aggregatzustand der Erstarrung und Verkrustung – neue Ideen wurden schlicht nicht rezipiert.

In einer der Vitrinen im Braunschweigischen Landesmuseum befindet sich das Geschoss, mit dem Herzog Carl Wilhelm Ferdinand bei der Schlacht bei Jena und Auerstedt im Jahr 1806 so schwer im Auge getroffen wurde, dass er kurze Zeit später seiner Verwundung erlag. Es handelt sich um eine kleine Bleikugel aus einer Muskete – 61 Jahre nach Publikation der Eulerschen *Neue Grundsätze* und 23 Jahre nach Eulers Tod.

⁵⁸ A.R. HALL: a.a.O.

⁵⁹ BRETT D. STEELE: Military "Progress" and Newtonian Science in the Age of Enlightenment. In: Brett D. Steele, Tamera Dorland: *The Heirs of Archimedes. Science and the Art of War Through the Age of Enlightenment*. Cambridge, Mass., 2005.

⁶⁰ MERRITT ROE SMITH: *Harpers Ferry Armory and the New Technology. The Challenge of Chance*. Ithaca 1977.